

В. Л. КОЛМОГОРОВ, Ю. Н. ЛОГИНОВ, С. И. ПАРШАКОВ
(Уральский политехнический институт),
С. В. ШИЛОВ (ЦНИИТяжмаш)

О ГИПОТЕЗЕ ЕДИНОЙ КРИВОЙ ДЛЯ НЕКОМПАКТНЫХ СРЕД

Как было показано в работе [1], уравнения связи между напряжениями и деформациями для некомпактного материала, не обладающего вязкими свойствами, следует формулировать в виде

$$T = T(\Lambda, \rho_0, \varepsilon), \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma(\Lambda, \rho_0, \varepsilon), \quad (2)$$

где T и σ — соответственно интенсивность касательных напряжений и гидростатическое напряжение; Λ и ε — соответственно степени деформации сдвига и объема; ρ_0 — начальная плотность материала.

Отметим, что текущая плотность ρ связана с ρ_0 и ε очевидным соотношением, вытекающим из условия неразрывности или сохранения массы:

$$\rho = \rho_0 \exp \varepsilon. \quad (3)$$

В работах [2, 3] была предложена методика получения физических уравнений типа (1), заключающаяся в математической обработке результатов, полученных при ступенчатой осадке цилиндрических образцов, изготовленных из некомпактного материала с различной начальной плотностью. При помощи уравнений связи возможно определение напряженного состояния по известному деформированному состоянию и наоборот. Причем уравнения связи напряжений и деформаций должны быть справедливы в любых процессах обработки металлов давлением, при любых схемах напряженного и деформированного состояний. В случае невязкого несжимаемого материала, как показали многочисленные эксперименты, таким свойством обладает соотношение $T = T(\Lambda)$, а положение о независимости этой функции от напряженно-деформированного состояния называют *гипотезой единой кривой*.

В случае сжимаемого некомпактного материала подобные зависимости между инвариантными характеристиками нуждаются

в экспериментальном подтверждении. Авторы данной работы решили проанализировать опытные данные, полученные в различных экспериментах, с целью проверки гипотезы единой кривой при деформации некомпактных материалов.

**Сравнение T по результатам экспериментов осадки
и прессования в закрытой пресс-форме**

Осадка				Прессование			$\frac{T^{пр} - T^{ос}}{T^{ос}}$
β	ρ/ρ_0	λ	$T^{ос},$ МПа	$\sigma_{zz},$ МПа	χ	$T^{пр},$ МПа	
0,83	2,86	1,21	250	78	0,37	284	0,14
0,83	3,03	1,28	290	90	0,38	322	0,11
0,90	3,10	1,30	320	102	0,39	359	0,12
0,91	3,13	1,31	340	105	0,39	370	0,08

В работе [2] установлены графические зависимости $T = T(\Lambda, \rho_0, \varepsilon)$, по результатам ступенчатой осадки пористых образцов из порошка железа марки ПЖ2, полученных по технологии: прессование со смазкой в закрытой пресс-форме, спекание в атмосфере водорода в течение 30 мин при 1150°C (здесь ρ_k — плотность компактного материала). Авторами данной работы эти зависимости были аппроксимированы с помощью метода наименьших квадратов функцией вида

$$T = (a + b\Lambda^c)(d + e\rho^f), \quad (4)$$

где $a = 1,23$; $b = 0,68$; $c = 0,907$; $d = 0,174$; $e = 0,794$; $f = 2,71$ (ρ , г/см³; T , МПа).

В монографии [4] приведены кривые, отражающие зависимость удельного давления деформации σ_{zz} от относительной плотности $\beta = \rho/\rho_k$ при прессовании железного порошка той же марки в закрытой пресс-форме. Отметим, что при прессовании в закрытой пресс-форме, как это показано в [3], имеет место однозначная связь между Λ и ε :

$$\Lambda = 1,15 \varepsilon \quad (5)$$

или, учитывая (3)

$$\Lambda = 1,15 \ln \frac{\rho}{\rho_0} = 1,15 \ln \frac{\beta}{\rho_0/\rho_k} \quad (6)$$

Интенсивность касательных напряжений при прессовании в закрытой пресс-форме и при осадке подсчитывается соответственно по формулам [3]

$$T^{пр} = \sigma_{zz}^{пр} (1-\chi)/\sqrt{3}, \quad (7)$$

$$T^{ос} = \sigma_{zz}^{ос} / \sqrt{3}, \quad (8)$$

где χ — коэффициент бокового давления; $\sigma_{zz}^{пр}$ и $\sigma_{zz}^{ос}$ — соответственно давление прессования и осадки.

Из условия проведения опыта $\rho_0/\rho_k = 0,290$. Коэффициент бокового давления при прессовании железного порошка определяли в функции β из работы [4, с. 131]. Из таблицы, в которой представлены исходные и расчетные данные, видно, что расхождение величины T при всех рассмотренных значениях β в двух различных опытах не превышает 14 %. Более высокие значения T в случае прессования в закрытой пресс-форме можно объяснить действием сил трения на ее стенке, которое нами не учитывалось. На основании изложенного, можно сделать предположение о том, что зависимость (1) обладает свойством единой кривой, по крайней мере в области сжимающих нагрузок.

Обратимся теперь ко второму физическому уравнению (2). Гидростатическое напряжение в случае осадки цилиндрического образца из некомпактного материала определится из формулы

$$\sigma^{oc} = \sigma_{zz}^{oc} / 3, \quad (9)$$

в случае прессования в закрытой пресс-форме

$$\sigma^{пр} = \sigma_{zz}^{пр} (1 + 2\chi) / 3, \quad (10)$$

Как это было показано выше, $T^{пр} = T^{oc}$, тогда из формул (7) и (8) следует

$$\sigma^{oc} = \sigma_{zz}^{пр} (1 - \chi). \quad (11)$$

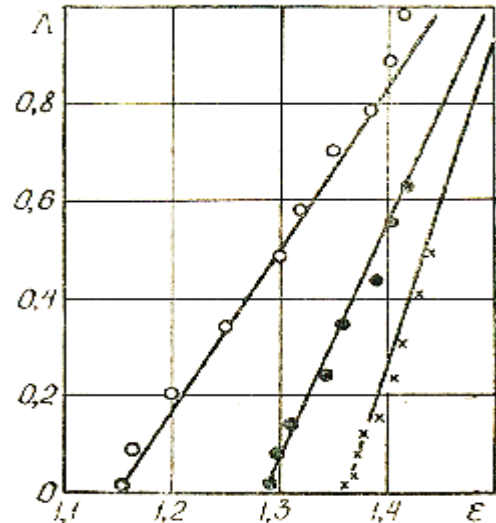
Подставив в (9) этот результат и учитывая (10), получим

$$\sigma^{oc} = \frac{(1-\chi)}{(1+2\chi)} \sigma^{пр}. \quad (12)$$

Поскольку $\chi \neq 0$, то из (12) следует, что $\sigma^{oc} \neq \sigma^{пр}$, т. е. гидростатическое напряжение зависит от вида испытания.

В качестве параметра, который характеризовал бы вид испытания, предлагается ввести безразмерный показатель $d\Lambda/d\varepsilon$, определяющий соотношение между деформациями сдвига и объема, возникающими в данном процессе. В случае прессования в закрытой пресс-форме, как это видно из формулы (5), $\frac{d\Lambda}{d\varepsilon} = 1,15$.

Для изучения этого параметра при осадке авторами были поставлены соответствующие эксперименты. Из медного порошка марки ПМС1 с $\rho = 1,91 \text{ г/см}^3$ деформацией в пресс-форме и последующим спеканием были изготовлены цилиндрические образцы 19x15 мм, которые подвергались затем ступенчатой осадке на испытательной машине УИМ-10 со скоростью перемещения бойков 20 мм/мин при использовании смазки — смеси солидола с графитом. Данные



Зависимость $\Lambda = \Lambda(\sigma)$ при осадке цилиндрических образцов с различной начальной плотностью:

○ — $\varepsilon_0 = 1,15$; • — 1,29; × — 1,37

эксперимента обрабатывались по методике, изложенной в работах [1, 3]; были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии (4): $a = 1,57$; $b = 18,61$; $c = 0,219$; $d = 2,54$; $e = 0,265$; $f = 1,509$.

По экспериментальным данным были построены зависимости $\Lambda = \Lambda(\varepsilon)$, некоторые из которых представлены на рисунке. Выявлено, что показатель $d\Lambda/d\varepsilon$, определяющий тангенс угла наклона графика $\Lambda = \Lambda(\varepsilon)$ к оси абсцисс, постоянен в течение всего процесса осадки образца с данной исходной объемной степенью деформации ε_0 . Среднее в опытах значение $d\Lambda/d\varepsilon$ равняется 4,60. Из (7) — (10) можно сформулировать два граничных условия, которым должно удовлетворять уравнение (2)

$$\begin{aligned}\sigma &= T/\sqrt{3} && \text{при } d\Lambda/d\varepsilon = 4,60 \\ \sigma &= mT/\sqrt{3} && \text{при } d\Lambda/d\varepsilon = 1,15\end{aligned}\quad (13)$$

где $m = \frac{1+2\chi}{1-\chi}$ — некоторый параметр, являющийся функцией плотности. В работе [5] для ряда материалов приведены зависимости $\chi = f(\beta)$, которые можно аппроксимировать уравнением

$$\chi = A\beta + B, \quad (14)$$

где для медного порошка $A = 0,35$; $B = 0,22$.

С учетом (3) параметр m определится из формулы

$$m = \frac{1+2\left(A\frac{\rho_0}{\rho_k} \exp \varepsilon + B\right)}{1-A\rho/\rho_k \exp \varepsilon - B} \quad (15)$$

Условию (13) удовлетворяет, например, уравнение, сконструированное следующим образом:

$$\sigma = \frac{T}{\sqrt{3}} \left[1 + (m - 1) \left(1,33 - 0,29 \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \right) \right] \quad (16)$$

Для рассмотренных выше двух схем деформации (осадки и прессования в закрытой пресс-форме) такая зависимость обладает свойством единой кривой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колмогоров В. Л., Логинов Ю. Н. О физических соотношениях для некомпактных материалов. — В кн.: Антифрикционные и фрикционные материалы. Киев, 1978.
2. Гун Г. Я., Полухин П. И., Фролов А. А. К методике определения реологических свойств пористых материалов. — Изв. вузов. Черная металлургия, 1976, №3.
3. Логинов Ю. Н., Шарафутдинов Н.Н., Колмогоров В. Л. Об уравнениях связи напряжений и деформаций для сжимаемого жестко-пластического материала. — Технология легких сплавов, 1977, №4.
4. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков. — М., 1969.
5. Меерсон Г. А., Рассказов Н. И., Чулков В. П. Экспериментальные исследования процесса прессования порошкообразных материалов. — Порошковая металлургия, 1970, № 1.